

Zdeněk Hradílek, Jan Lindovský

# Integrace větrných elektráren do elektrizační soustavy

Abstrakt:

V článku je popsán vývoj větrné energetiky v ČR a jeho důsledky pro elektrizační soustavu. Dále se zabývá popisem simulátoru větrných elektráren, který je aplikován na reálné podmínky VTE umístěné v ČR. Je zde uvedeno porovnání naměřených a simulovaných hodnot činného výkonu VTE s vyhodnocením chyby simulace.

## ÚVOD

Globálním problémem integrace větrných elektráren do elektrizační soustavy je charakter generovaného výkonu z VTE, který je zcela nahodilý a značně kolísá v závislosti na rychlosti větru. Výkon z větrných elektráren bude potřeba předpovídat, aby bylo možné udržet dostatečné množství regulační energie pro udržení stabilního provozu elektrizační soustavy. Cílem příspěvku je naznačení možného způsobu řešení tohoto problému prostřednictvím simulátoru větrných elektráren.

## I. VÝVOJ VĚTRNÉ ENERGETIKY V ČR

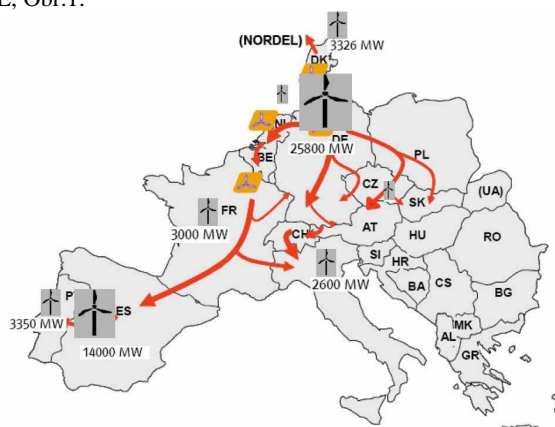
V současnosti je v ČR dle údajů ČSVE [1] provozováno 135 větrných elektráren o jednotkovém instalovaném výkonu vyšším než 100 kW. Celkový instalovaný výkon větrných elektráren činí 145 MW, což představuje 0,83 % celkového instalovaného výkonu v naší ES. Podíl VTE na celkové výrobě elektřiny v ČR je s ohledem na jejich nízké využití prozatím zanedbatelný, jen asi 0,3 %. Je však patrný velký zájem investorů o nové projekty VTE včetně velkých větrných parků. Většina VTE provozovaných v ČR je vyvedena do sítě VN. Velké větrné parky se však zapojují již také do přenosové sítě.

V následujících letech se plánuje výstavba dalších strojů v celkové kapacitě až 700 MW, což by představovalo asi 4 % instalovaného výkonu soustavy. Umístění VTE se předpokládá především na území Krušných hor, Jeseníků a střední a jižní Moravy. Lokality vhodné pro výstavbu jsou vybírány zejména podle povětrnostních poměrů. Při výstavbě je však zapotřebí zohlednit také nežádoucí vlivy větrných elektráren jako je narušení krajinného rázu, vliv infrazvuku, apod. Neopomenutelná je studie lokality z technického hlediska, tzn. posouzení přípojného místa z pohledu zkratového výkonu, dostatečně dimenzovaného vedení, přístupnosti, atd. Celkový potenciál vhodných lokalit pro výstavbu VTE je pak značně omezen. Množství instalovaných VTE bude záležet na technologickém vývoji VTE, možnostech akumulace, investicích do přenosových a distribučních sítí. V neposlední řadě na vládních institucích, které podporují výstavbu obnovitelných zdrojů formou garantovaných výkupních cen. I přes nastávající ekonomickou krizi, která se projevuje poklesem poptávky po elektrické energii se však dá očekávat výstavba větrných farem ve větším měřítku.

## II. VLIV ZVÝŠENÍ VÝROBY VTE NA PŘENOSY ELEKTŘINY

Při velmi příznivých povětrnostních podmínkách dochází k velkému nárůstu výroby větrných farem, kdy dodávají téměř nepřetržitě jmenovitý výkon do sítě. Při velkém zastoupení větrných elektráren v dané oblasti je nutné přenášet značné výkony z oblasti

výroby větrných elektráren do oblastí spotřeby. Jsou tak značně zatěžovány přenosové vedení. Mnohdy se jedná o mezistátní přenosy výkonů, které mohou narušit stabilitu provozu elektrizační soustavy UCTE, Obr.1.



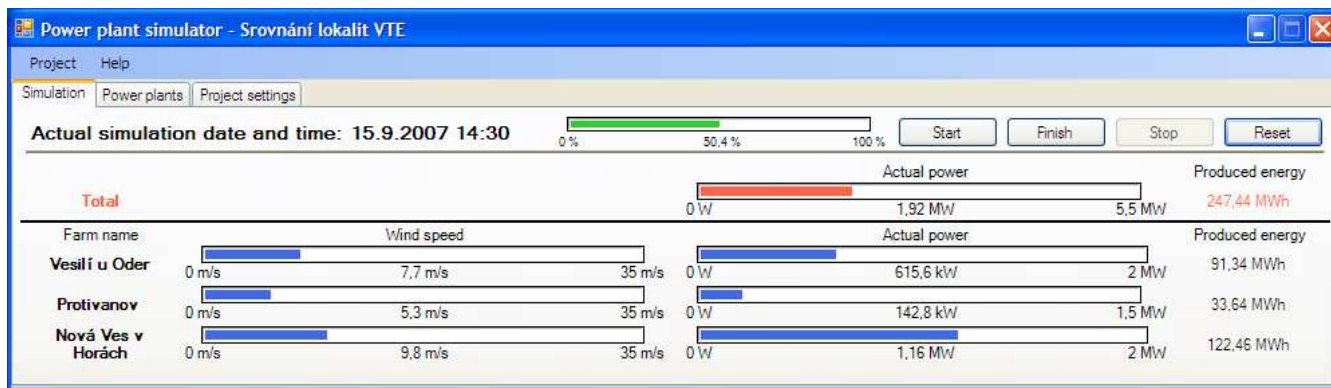
Obr. 1. Mezistátní přenos výkonu vlivem větrných elektráren

Při velké integraci VTE do ES bude potřeba v mezních situacích účast větrných elektráren na regulaci soustavy. Zejména bude potřeba zajistit technické nástroje pro měření a komunikaci mezi dispečinkem PS a VTE. V mezních stavech se budou muset VTE podřídit povelům dispečinku. Snahou provozovatele přenosové soustavy je také zapojit provozovatele VTE na plánování a přípravě provozu ES.

## III. SIMULÁTOR VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN

Problémy spojené s integrací větrných elektráren do ES lze do jisté míry kompenzovat předpovědí generovaného výkonu na několik hodin dopředu. Předpověď generovaného výkonu představuje pro provozovatele přenosové soustavy nástroj, jak se částečně připravit na neplánovaný nedostatek nebo přebytek činného výkonu v soustavě. Pravděpodobně vyráběný činný výkon z farem větrných elektráren lze určovat na základě předpovědi rychlosti větru a následném přepočtu podle výkonové křivky VTE. Tento problém řeší simulátor větrných elektráren (Obr.2), který je vyvíjen na VŠB-TU v Ostravě. Vzhledem k množství dat, které zpracovává, je náročný na operační paměť počítače. Paralelně s vývojem programu je vytvářena databáze větrných elektráren [2], které se vyskytují na území ČR. V databázi jsou informace o přesné poloze větrných elektráren, která je popsána prostřednictvím GPS souřadnice. Jejich přesná lokalizace je důležitá pro potřeby předpovědi prostřednictvím ČHMI.

V programu je možné editovat výkonovou křivku, která nám určuje kolik výkonu větrná elektrárna dodává do sítě při různé rychlosti větru. Výkonové křivky jednotlivých typů VTE mohou být odlišné a je možné je editovat podle naměřených popř. katalogových údajů.



Obr. 2. Simulátor větrných elektráren

Algoritmus výpočtu simulátoru spočívá v přiřazení činného výkonu VTE podle aktuální rychlosti větru:

$$v_1, v_2, \dots, v_i \rightarrow P_1, P_2, \dots, P_i$$

kde  $v$  je rychlost větru,  
 $p$  procentuální hodnota činného výkonu,  
 $i$  počet naměřených nebo předpovídaných hodnot

Aktuální činný výkon VTE je pak dán vztahem:

$$P_{WPP} = \frac{P_1 \cdot P_{RATED}}{100} \quad [MW]$$

kde  $P_{RATED}$  je instalovaný výkon VTE.

Množství odhadované vyprodukované energie VTE:

$$W_{WPP} = \sum_1^i (P_{WPPx} \cdot t_x) = (P_{WPP1} \cdot t_1) + (P_{WPP2} \cdot t_2) + \dots + (P_{WPPm} \cdot t_i) \quad [MWh]$$

kde  $t$  je časový krok simulace.

Pro aktuální činný výkon větrné farmy v libovolném kroku můžeme psát:

$$P_F = \sum_1^n P_{WPPx} = P_{WPP1} + P_{WPP2} + \dots + P_{WPPn} \quad [MW]$$

kde  $n$  je počet větrných elektráren ve farmě.

Množství vyprodukované energie farmy VTE:

$$W_F = \sum_1^n W_{WPPx} = W_{WPP1} + W_{WPP2} + \dots + W_{WPPn} \quad [MWh]$$

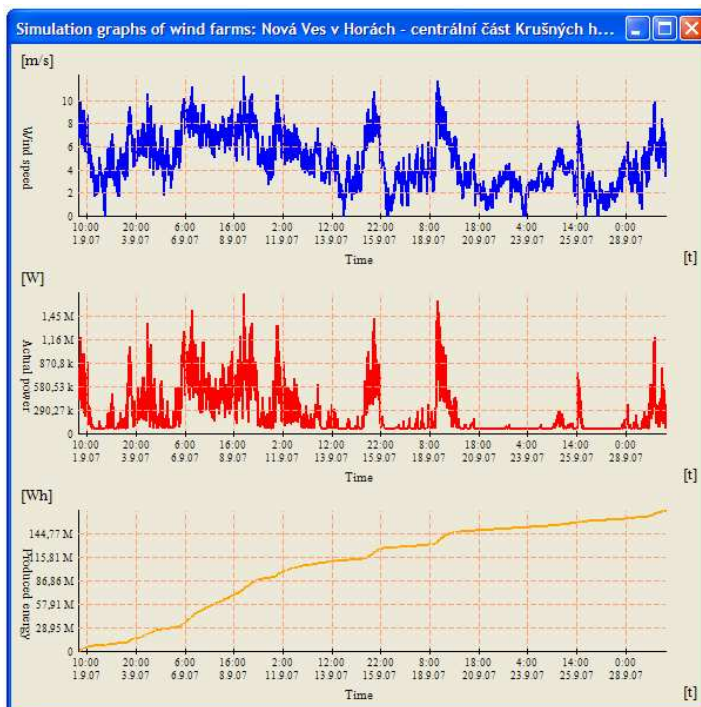
Pro celkový výkon farem větrných elektráren můžeme napsat:

$$P_{TOTAL} = \sum_1^m P_{Fx} = P_{F1} + P_{F2} + \dots + P_{Fm} \quad [MW]$$

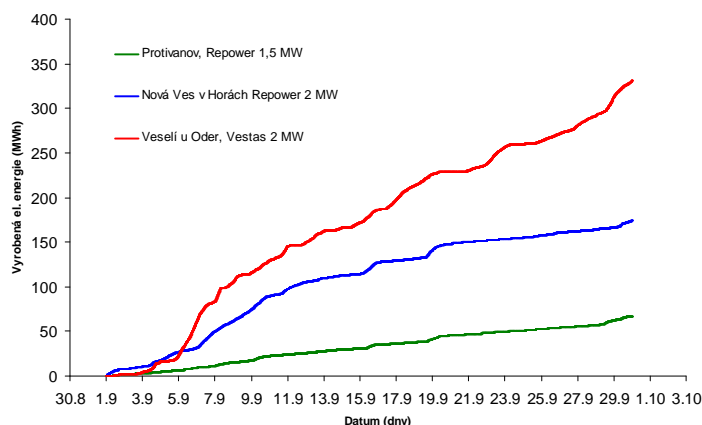
A konečně pro celkový odhad produkované energie platí:

$$W_{TOTAL} = \sum_1^m W_{Fx} = W_{F1} + W_{F2} + \dots + W_{Fm} \quad [MWh]$$

Na Obr.3 je znázorněna ukázka simulátorem vytvořeného grafu zobrazujícího průběh okamžité rychlosti větru, dopočtený aktuální výkon a množství vyrobené energie větrné elektrárny v Nové vsi v Horách.



Obr.3. Graf celkové vyprodukované energie získané ze simulátoru



Obr. 4. Porovnání lokalit podle vyrobené energie

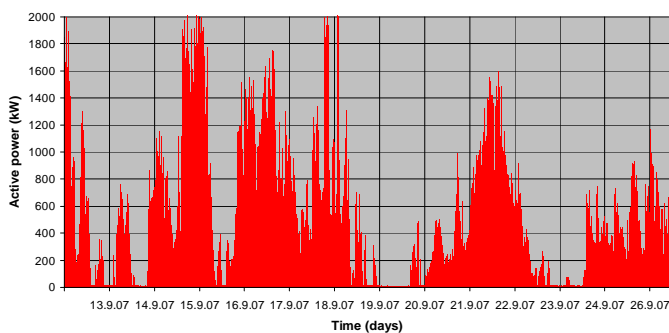
Na Obr. 4 jsou zobrazeny průběhy vyprodukované energie ze tří lokalit na území ČR. Jedná se o lokalitu Veselí (Oderské vrchy), umístěnou v nadm. výšce 539 m, dále lokalitu Protivanov (Drahanská vrchovina) nadm. výška 680 m a lokalitu Nová Ves v Horách (Krušné hory) nadm. výška 730 m.

Grafy byly rovněž získány pomocí simulátoru větrných elektráren. Přesnost výpočtu elektrické energie byla potvrzena měřením s následným vyhodnocením chyby. Jako vstupní data pro simulátor posloužilo měření ze stanic ČHMI. Dále pak výkonové křivky jednotlivých větrných elektráren, které byly převzaty z katalogových údajů od výrobců [3].

Porovnáním průběhů na Obr. 4, můžeme říci, že v množství vyrobené elektrické energie, hraje důležitou roli zejména umístění větrné elektrárny, dále pak výkon a typ použitého generátoru. Ze tří lokalit vhodných pro provoz VTE nám nejlépe vyšla oblast Oderských vrchů, kde je znatelně větší využití elektrické energie než v jiných oblastech. Ze simulace vyplynulo, že velikost nadmožské výšky není rozhodující pro stanovení vhodnosti lokality. Směrodatná není ani průměrná rychlost větru, neboť VTE nevyrábí elektrickou energii při překročení provozní rychlosti VTE.

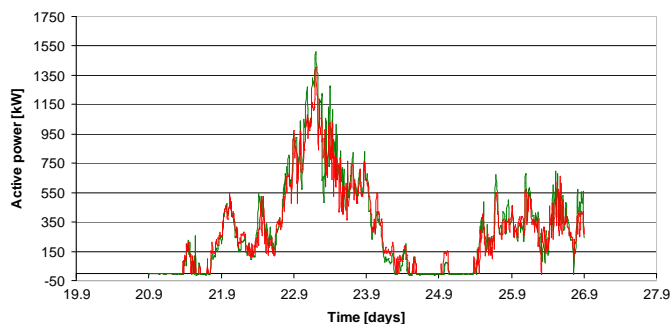
#### IV. MĚŘENÍ VÝKONU VTE V LOKALITĚ ČR

Na Obr. 5 je reálně naměřený průběh větrné elektrárny, provozované v lokalitě větrné farmy Veselí, nedaleko obce Dobešov, Oderské vrchy. Měření proběhlo pomocí analyzátoru kvality elektrické energie BK-505. Kromě parametrů napětí a proudu nás zajímal zejména průběh činného výkonu a množství vyrobené elektrické energie, abychom mohli porovnat naměřené hodnoty s hodnotami ze simulátoru. Větrná elektrárna v průběhu měření vyprodukovala 135 MWh elektrické energie, [4]. Koefficient využití dosáhl 20 %. Návratnost investice je pod 10 let při respektování garantované výkupní ceny 2,46 Kč/kWh.



Obr. 5. Ukázka naměřeného činného výkonu

Na Obr. 6 je znázorněn průběh měřeného výkonu (zelený) a graf získaný ze simulátoru (červený) sledované větrné elektrárny ve Veselí. Simulátor vypočetl 151 MWh elektrické energie a dosáhlo se tak dobré korespondence s reálným průběhem. Celková chyba v určení elektrické energie vyprodukované větrnou elektrárnou byla okolo 10 %.



Obr. 6. Porovnání naměřených a simulovaných hodnot

Porovnáním obou průběhů můžeme říci, že simulovaný výkon dobře kopíruje reálně dodávaný výkon. Nicméně chyba v určení energie vzniká a to zejména ve dvou případech. Za prvé tehdy, když je rychlost větru pod startovací rychlostí potřebné pro najetí VTE. V tomto případě se větrná elektrárna chová jako spotřebič činného výkonu a simulátor tento stav nedokáže rozlišit.

Druhým případem je situace, kdy jsou zvlášť příhodné povětrnostní podmínky. Výkon z VTE pak závisí na třetí mocnině rychlosti větru:

$$P = \rho \cdot \frac{v^3}{2} \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4} \cdot c_p = 0,125 \cdot \rho \cdot \pi \cdot v^3 \cdot D^2 \cdot c_p$$

kde:

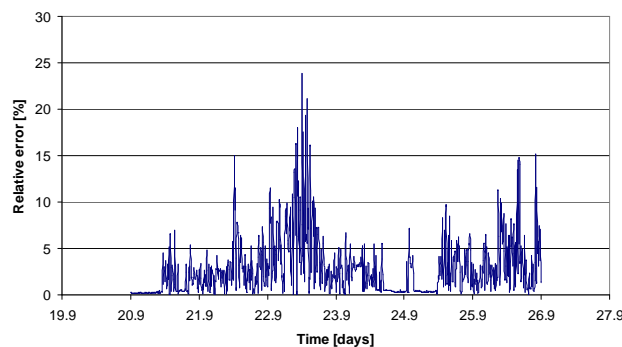
$c_p$  výkonostní koeficient

$D$  průměr rotoru

$\rho$  hustota vzduchu

Strmá závislost činného výkonu na rychlosti větru má vliv na chybu simulace. Při vyšších rychlostech větru má simulátor vyšší odchylku, protože simulovaná a reálná odchylka je mocněna třetí mocninou.

Na Obr. 7 je průběh relativní chyby simulace pro daný časový úsek. Je viditelné, že chyba je v proporci s činným výkonem. Průměrná chyba je okolo 5 %, v extrémních situacích okolo 15 %.



Obr. 7. Relativní chyba simulace

Pro porovnání měřených a simulovaných dat byla určena statistická analýza dat. Tato analýza popisuje chybu simulace. Střední chyba simulace se pohybovala pod 3 %.

Statistická data	$P_{measured}$	$P_{simul}$	Error
Stř. hodnota	307,2366	294,4081	2,764977
Chyba stř. hodnoty	10,83027	9,724618	0,105071
Medián	236,3	241,6	1,885
Modus	-5,7	0	0,285

Směr. odchylka	318,5277	286,0096	3,090229
Rozptyl výběru	101459,9	81801,48	9,549518
Špičatost	1,130896	0,97639	7,625909
Šikmost	1,196049	1,132689	2,299599
Rozdíl max-min	1524,5	1401,4	23,82001
Minimum	-13,7	0	0,025
Maximum	1510,8	1401,4	23,84501
Součet	265759,7	254663	2391,705
Počet	865	865	865

## V. ZÁVĚR

Simulátor, který je nyní plně funkční ve statickém módu, lze využít k přesnému výpočtu vyprodukované energie větrné elektrárny, popř. celé farmy větrných elektráren na základě měření v dané lokalitě. Investoři si tak mohou na základě naměřené rychlosti větru stanovit roční produkci z VTE a určit předpokládanou dobu návratnosti investice. Mohou být mezi sebou porovnány jednotlivé lokality z hlediska vhodnosti k výstavbě. Na rozdíl od hrubého odhadu produkce VTE z průměrné rychlosti větru nabízí simulátor možnost přesného stanovení produkce elektrické energie z VTE. Vzhledem

k minimální a maximální provozní rychlosti větru pro provoz VTE může být lépe odhadnut větrný potenciál dané lokality než v případě odhadu pomocí průměrné rychlosti větru.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl připraven v rámci výzkumného projektu MSM 6198910007.

## LITERATURA

- [1] Český společnost pro větrnou energii, <http://csve.cz/>.
- [2] Databáze větrných elektráren, <http://homel.vsb.cz/~lin045/>
- [3] Katalogové údaje výrobců Vestas, Repower, Enercon
- [4] Hradílek, Z., Lindovský, J.: Produce energy simulation of wind power plants, sborník doktorandských prací, Ostrava, 2008, 120-125.

## ADRESY AUTORŮ

Zdeněk Hradílek, VŠB-TU Ostrava, Katedra elektroenergetiky, 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, ČR, [zdenek.hradilek@vsb.cz](mailto:zdenek.hradilek@vsb.cz)  
 Jan Lindovský, VŠB-TU Ostrava, Katedra elektroenergetiky, 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, ČR, [jan.lindovsky.fe@vsb.cz](mailto:jan.lindovsky.fe@vsb.cz)